

月球科研站关键区域智能选址及其典型环境要素分析

冯永玖^{1,2,3}, 唐盼丽^{1,2}, 陈书睿^{1,2}, 席梦镭^{1,2}, 叶真^{1,2}, 金雁敏^{1,2}, 刘世杰^{1,2},
李浩腾^{1,2}, 王蓉^{1,2,3}, 李鹏朔^{1,2}, 童小华^{1,2}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学 上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学 上海自主智能无人系统科学中心, 上海 200092)

摘要: 为服务未来国际月球科研站(ILRS)任务, 搜索到符合科学目标和工程安全要求的探测区域, 开展了着陆探测智能选址, 以及着陆区典型要素和巡视可达性的综合分析。在着陆选址方面, 基于 1D-CNN 选址模型在南极 Scott M 的西南侧遴选并划定了 4 个预选着陆区; 针对着陆区关键要素, 对实时光照和辐射、物理温度剖面、水冰赋存等环境特征进行了遥感探测与精细分析; 针对巡视可达评估, 采用顾及能量消耗的路径规划模型, 评估预选着陆区中心点至潜在水冰点的巡视可达性。结果表明, 预选着陆区均满足着陆适宜性, 具有地形安全性高、供能高等特征。该研究的综合分析方法也可用于评估其他潜在着陆区的典型环境特征, 为 ILRS 的着陆选址和科学目标巡视探测提供有益参考。

关键词: 月球科研站; 着陆选址; 典型环境要素; 路径规划; Scott M

中图分类号: P184

文献标志码: A

Analysis of Typical Environmental Elements in Intelligently Selected Regions for International Lunar Research Station

FENG Yongjiu^{1,2,3}, TANG Panli^{1,2}, CHEN Shurui^{1,2}, XI Mengrong^{1,2}, YE Zhen^{1,2}, JIN Yanmin^{1,2}, LIU Shijie^{1,2}, LI Haoteng^{1,2}, WANG Rong^{1,2,3}, LI Pengshuo^{1,2}, TONG Xiaohua^{1,2}

(1. College of Surveying & Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Planetary Mapping and Remote Sensing for Deep Space Exploration, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Research Institute for Intelligent Autonomous Systems, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To select the regions with both high engineering safety and scientific interest for International Lunar Research Station (ILRS), this study conducted a thorough analysis using intelligent site selection, evaluation of typical elements, and assessments of rover accessibility across the selected regions. By leveraging the 1D-CNN site selection model, 4 candidate landing sites were pinpointed and outlined in the southwestern region of Scott M. Additionally, environmental elements such as real-time illumination, radiation levels, physical temperature variations and presence of water ice were remotely detected and meticulously examined in these selected zones. Furthermore, a traverse planning model with a consideration of the energy consumption was employed to assess the accessibility to water ice from the central points of the candidate landing zones. The results indicate that the candidate landing zones are optimized for both terrain safety and energy supply. The comprehensive approach can also serve as a valuable framework for analyzing the typical environmental patterns in other potential site selection regions, providing a useful reference for ILRS landing site selection and scientific detection.

Keywords: International Lunar Research Station (ILRS); site selection; typical environmental elements;

收稿日期: 2024-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42371422, 42221002)

第一作者: 冯永玖, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空间分析建模及其深空探测应用。

E-mail: yjfeng@tongji.edu.cn

通信作者: 童小华, 中国工程院院士, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为航天测绘遥感与深空探测。

E-mail: xhtong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

traverse planning; Scott M

国际月球科研站(ILRS)是面向长期月球探测并自主运行的综合性科学实验基地^[1-3],我国计划于2030年前后在月球南极建成其基本型。Scott M地处月球南极高地,具有光照充足、地质古老、水冰赋存、对地通讯时间长等特点,被列为南极潜在着陆探测区^[4-5]。鉴于月球南极复杂地形环境、特殊地理位置及重要探测价值^[6],在Scott M附近区域开展月球科研站选址、典型环境要素分析,对未来ILRS任务实施和建设至关重要。

着陆区既要满足工程安全需求,又要确保其科学价值^[7-9]。对于月球南极着陆选址,现有研究主要采用多指标叠加法^[10-11],例如,俄罗斯学者结合坡度、光照、对地通讯、水冰等4类指标,为俄罗斯Luna-Glob计划遴选了6个着陆区^[12];NASA学者考虑地形、地质和通讯条件分析了美国“Artemis”计划的着陆区Mons Malapert^[13]。在构建合理指标体系的基础上,选址方法的选择和差异则会影响到选址结果;但是,不同区域的环境特征存在显著差异,应用统一的选址方法难以适应大范围的着陆区遴选。为此,Feng等综合月球南极多源空间数据的量化指标,提出利用深度学习对选址知识和专家规则进行学习,满足多目标选址需求,从而提高着陆选址的可靠性和应用价值^[14]。

进一步开展光照、辐射、温度、水冰等典型环境要素的分析,对于着陆区评估与巡视任务规划至关重要。对于光照和辐射分析,已有文献主要采用国际240m分辨率的光照数据产品^[15],以太阳盘面的可见比例表征平均太阳光照率。对于温度分析,主要基于轨道器数据产品或物理模型模拟结果来开展分析^[16],如LRO Diviner红外热辐射数据和一维热传模型模拟的物理温度数据^[17-18]。在水冰探测方面,主要采用M3、LRO Mini-RF等结合数据半经验模型进行探测^[19],但也需考虑赋存温度阈值(110 K)^[20]。随着同济大学高分辨率地形、光照、辐射、水冰等数据产品研制^[21-22],为进一步精化分析月球南极着陆区的环境特征提供了可能,但也需改进相应分析方法实现环境特征的精准挖掘,为科学价值实现和工程安全提供保障。

本文旨在利用团队前期提出的方法和研制的数据产品,具体地,首先利用1D-CNN选址模型在月球南极Scott M区域遴选并划定预选着陆区,利

用遥感探测和模型模拟方法分析实时光照和辐射、物理温度剖面、潜在水冰点,利用巡视路径规划方法研制着陆区中心点到水冰点的通达性,通过上述综合分析以期为着陆选址和巡视探测提供有益支撑。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据

本文主要使用LRO系列遥感数据、产品和星历数据,包括:①20m分辨率LRO LOLA DEM、同济研制1.5m分辨率DEM、同济研制1.5m分辨率光照数据产品,用于分析区域地形、规划巡视路径、研制高分辨率光照和辐射数据;②LRO Diviner的热辐射亮温数据,空间分辨率为240m,用于温度约束辅助探测水冰;③LRO Mini-RF的雷达数据,空间分辨率为30m,用于辅助探测水冰。LRO系列数据由NASA行星数据系统发布(geo.pds.nasa.gov)。星历数据来源于NASA JPL的高精度月球星历DE430历表,用于结合地形数据研制高分辨率的光照和辐射数据产品。

1.2 研究方法

为开展月球科研站智能选址与环境要素分析,联合着陆探测智能选址、着陆区典型要素分析、着陆区巡视可达评估构建了综合分析技术方案(图1),主要包括3个部分:①结合工程指标和科学指标,利用1D-CNN选址模型进行着陆点遴选以及着陆区确定;②针对划定的着陆区,利用实时光照和辐射模型获取高分辨光照、辐射数据,利用顾及地形影响的一维热传模型模拟浅层物理温度剖面,采用多约束水冰探测模型评估潜在水冰点,实现多类型环境要素的综合分析;③以着陆区中心点为起点,采用顾及能量耗费的路径规划模型,评估至水冰点的巡视可达性。

1.2.1 1D-CNN选址模型

最近,Feng等提出了1D-CNN月球着陆选址模型^[14]。该模型顾及工程安全、科学价值的约束条件,综合月球南极的多源空间数据量化指标,包括5类工程指标(如地形、通信等)及7类科学指标(如水冰、地质等),利用1D-CNN算法进行选址知识和规则挖掘,通过卷积层、池化层、全连接层和Softmax等组成深度学习网络,实现对月球南极适宜着陆区的智能选址。

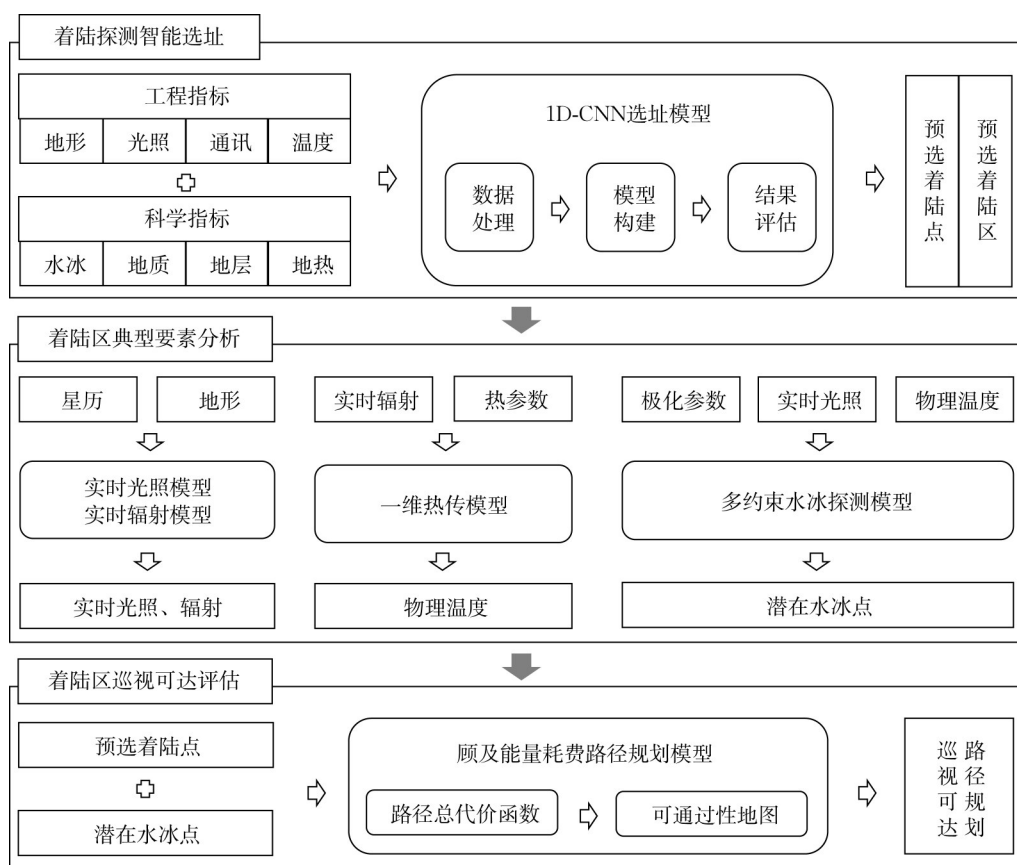


图1 国际月球科研站智能选址及其典型环境要素分析技术方案

Fig.1 Flowchart of intelligent site selection and analysis of typical environmental elements for ILRS.

1.2.2 实时光照和辐射模型

实时光照模型利用星历数据获取直射点经纬度,再根据直射点经纬度、观测点经纬度和球面三角函数确定观测点的实时太阳高度角和方位角,将太阳高度角与此时其所在的方位角上的地形数据进行对比,判断是否被地形遮挡,进而判断该观测点是否可以受到光照^[23]。实时太阳辐射模型综合实时太阳高度角、实时太阳方位角和局部地形高度角顾及地形对的影响,进而提升非平坦区域的实时太阳辐射模拟精度^[24]。

1.2.3 一维热传模型

一维热传模型是模拟月表和次表层温度变化的有效模型,可用于表征物理温度随时间和深度的变化。为准确模拟垂向物理温度,以年周期的实时太阳辐照度顾及地形对物理温度的影响,基于改进的一维热传模型进行物理温度的模拟。该模型涉及2个边界条件,即月表边界(上边界条件)和风化层底部边界(下边界条件),其中上边界条件取决于太阳辐射及月表红外辐射,下边界条件取决于月球内部热流^[25]。利用实时太阳辐照度作为其中的上边界条

件能有效顾及地形的影响,提高物理温度剖面模拟的准确性。具体见式(1):

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} + Q_s = \bar{\epsilon} \sigma T_s^4 \\ K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_*} = Q_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为随时间(t)和深度(z)变化的温度; ρ 为密度; c 为比热容; K 为物质的热导率; Q_s 此处为实时太阳辐照度; $\bar{\epsilon}$ 为发射率; σ 表示玻尔兹曼常数; Q_g 为地热通量。

1.2.4 多约束水冰探测模型

基于 Mini-RF 雷达、光照、温度等多重约束探测水冰,具体地,根据 Mini-RF 发射接收电磁波的形式,结合水冰的圆极化比值、极化度、相对相位、后向散射强度、回波增量权重等雷达反射特性,可用于高精度水冰的初步探测^[26];再综合平均光照率和连续无光照天数2个光照指标对水冰进行进一步探测,其中平均光照率为光照时长与总模拟时长之比,连续无光照天数为模拟时间内该区域连续没有受到光

照的最大天数;同时也考虑将水冰赋存阈值(110 K)作为温度约束条件^[27]。如式(2)所示:

$$\begin{cases} W_f = W_M \\ I_a < I_{aT} \\ I_d > I_{dT} \\ T_B < T_{BT} \end{cases} \quad (2)$$

式中: W_f 为基于雷达约束的初步水冰点, W_M 为 Mini-RF 雷达反射特性; I_a 为平均光照率, I_{aT} 为光照阈值; I_d 为连续无光照天数, I_{dT} 为无光照天数阈值; T_B 为亮温, T_{BT} 为亮温阈值。

1.2.5 顾及能量耗费的路径规划模型

顾及能量耗费的路径规划模型在规划月面长距离路径时,综合行驶安全以及能量产耗等多因素。首先基于太阳能产出与行驶耗费能量构建路径总代价函数;再综合考虑行驶方向、距离、坡度等多因素构建可通过性地图;进而基于路径总代价函数和可通过性地图构建启发式代价矩阵计算全局路径。如式(3)所示:

$$\begin{cases} C_s = C - E \\ C = A u I \sin \alpha_h \\ E = R_g + (R_c + R_b) n d \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_s 为路径总代价函数, C 为巡视器太阳能电池板的产出能量, E 为巡视器耗费能量; A 为太阳能电池板面积, u 为能量转换效率, I 为太阳能常量, α_h 为

高度角; R_g 为巡视器重力的沿坡分量, R_c 为风化层压实阻力, R_b 为月壤风化层阻力, n 为车轮个数, d 为移动距离。

2 研究结果

2.1 地形分析

基于 1D-CNN 的月球南极探测选址方法,考虑 Scott M 区域的地形特征、资源分布、任务需求等多因素开展着陆选址,遴选并划定了 33 个预选着陆区(图 2a),总面积达 74.5 km²,主要位于 Scott M 的西南部,其中存在 4 个大范围着陆区(Z1~Z4)。Z2 预选着陆区的面积最大,为 23.7 km²;其次为 Z3、Z4、Z1 预选着陆区,面积分别为 22.6、20.5、7.7 km²。顾及实际着陆情况,后续主要针对这 4 个大范围着陆区进行环境要素精细分析。

为分析各预选着陆区的地形安全,对比了 DEM(图 2b)及坡度(图 2c)。4 个预选着陆区中地形起伏最小的为 Z1 区域,区域内高程变化范围仅为 249 m(表 1);其次为 Z2、Z3 区域。按坡度范围可划分平坦区域(小于 7°)、局部起伏区域(7~15°)和危险起伏区域(大于 15°),Z2 和 Z3 预选着陆区的平坦区域面积占比高,其中 Z3 预选着陆区平坦区域面积占比达 97%,着陆工程安全性高。

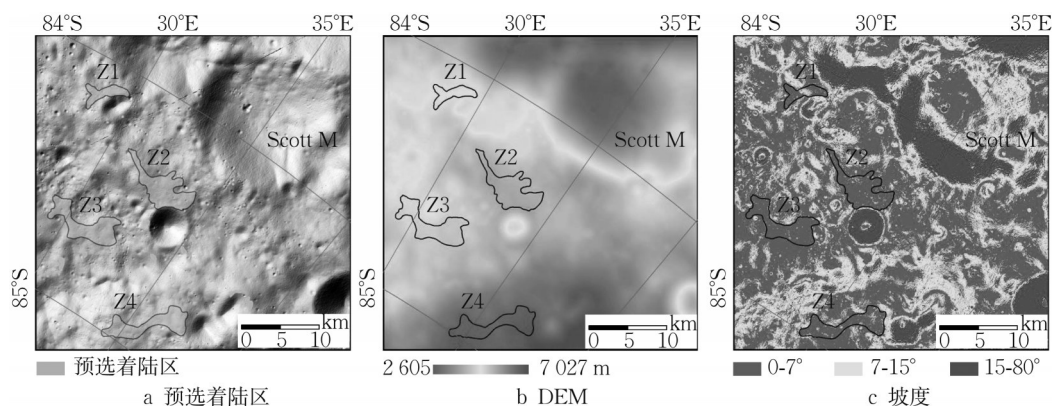


图2 Scott M区域地形特征

Fig.2 Topographic pattern of the Scott M

表1 预选着陆区 DEM 及坡度统计

Tab.1 Statistics on DEM and slope in the candidate landing zones.

| 区域 | DEM/m | | | | 坡度面积占比/% | | | |
|----|-------|-------|------|-------|----------|-------|--------|-----|
| | 区域最高值 | 区域最低值 | 变化范围 | 均值 | 小于 7° | 7~15° | 大于 15° | 总计 |
| Z1 | 5 023 | 4 774 | 249 | 4 896 | 84.85 | 15.09 | 0.06 | 100 |
| Z2 | 5 606 | 5 330 | 276 | 5 489 | 95.96 | 3.89 | 0.15 | 100 |
| Z3 | 5 284 | 4 997 | 287 | 5 162 | 97.24 | 2.65 | 0.11 | 100 |
| Z4 | 6 698 | 6 302 | 396 | 6 454 | 92.01 | 7.95 | 0.04 | 100 |

2.2 光照和太阳辐射特征分析

2.2.1 光照分析

为分析预选着陆区的光照,模拟了 2030—2031 一年内的年均光照率(图 3a)。年均光照率为一年内光照时长占总时长的比值,高值区主要位于 Scott M 撞击坑的外围,而低值区主要位于中小型撞击坑边缘。4 个预选着陆区年均光照率的区域均值存在显著差异,Z1 预选着陆区的区域均值最高(表 2);其次为 Z2 预选着陆区。

始终无光照的区域为永久阴影区(PSR),Scott M 附近区域的永久阴影区如图 3b 所示。区域内的永久阴影区零星分布于中小型撞击坑底部。在各个预选着陆区中,预选着陆区内的永久阴影区面积占比较小(表 2),但周围均存在大型永久阴影区。

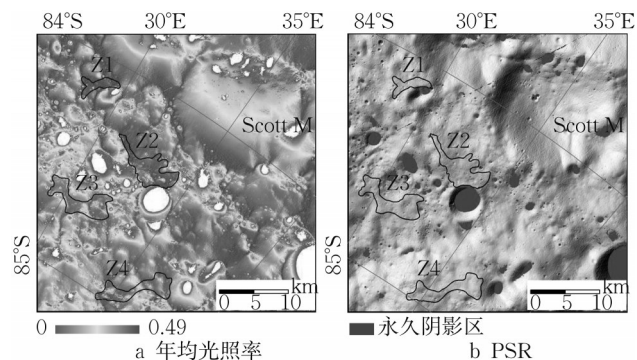


图3 Scott M 区域光照特征
Fig.3 Spatial pattern of illumination in the Scott M

表2 预选着陆区年均光照率及 PSR 统计
Tab.2 Statistics on average annual illuminance and PSR in the candidate landing zones.

| 区域 | 年均光照率/% | | 永久阴影区面积占比/% | | |
|----|---------|------|-------------|-------------|-----|
| | 区域最高值 | 区域均值 | 区域内永久阴影区占比 | 区域内非永久阴影区占比 | 总计 |
| Z1 | 47 | 39 | 0.31 | 99.69 | 100 |
| Z2 | 47 | 37 | 0.24 | 99.76 | 100 |
| Z3 | 41 | 33 | 0.13 | 99.87 | 100 |
| Z4 | 43 | 34 | 0.11 | 99.89 | 100 |

2.2.2 太阳辐射分析

为分析预选着陆区的太阳辐射,模拟了 2030—2031 一年内的最大太阳辐射和年均太阳辐射(图 4)。其中最大太阳辐射表征的是一年内太阳辐射的最大值;年均太阳辐射表征的是一年内太阳辐射的平均值。年最大太阳辐射的高值区主要位于区域内部分撞击坑的坑壁上,呈带状分布(图 4a)。白色区域为永久阴影区,在该年内未接收到有效太阳辐射。在各个预选着陆区中,Z1 预选着陆区最大太阳辐射值的区域均值最高(表 3);其次为 Z4 预选着陆区。

年均太阳辐射的空间特征与最大太阳辐射相似(图 4b),其中 Z1 预选着陆区的年均太阳辐射值的区域均值最高(表 3);其次为 Z4 预选着陆区。

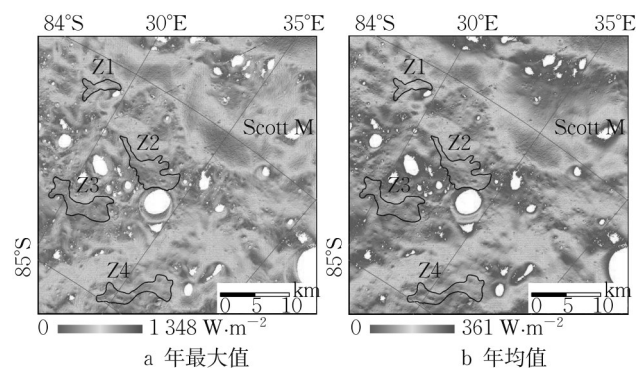


图4 Scott M 区域实时太阳辐射
Fig.4 Real-time solar radiation in the Scott M

表3 预选着陆区实时太阳辐射统计
Tab.3 Statistics on real-time solar radiation in the candidate landing zones.

| 区域 | 年最大太阳辐射/(W·m ⁻²) | | 年均太阳辐射/(W·m ⁻²) | |
|----|------------------------------|--------|-----------------------------|-------|
| | 区域最高值 | 区域均值 | 区域最高值 | 区域均值 |
| Z1 | 650.9 | 277.75 | 185.7 | 70.88 |
| Z2 | 768.02 | 231.66 | 189.12 | 55.18 |
| Z3 | 880.82 | 222.13 | 249.36 | 48.54 |
| Z4 | 867.58 | 251.51 | 190.26 | 57.37 |

2.3 浅层物理温度垂向特征

为分析预选着陆点浅层(0~2m)物理温度垂向变化,模拟了 4 个预选着陆区中心点(P1~P4)在 2030—2031 一年内的浅层物理温度剖面(表 4)。Z1 预选着陆区中心点的月表年均物理温度最高,为 164.2 K,且月表物理温度年最小值和最大值也最高,一年内月表物理温度变化也最大。各着陆点温度收敛的深度在 0.5m 左右,最浅的为 P1 点,收敛深度为 0.44m,该深度时物理温度为 185.1 K;收敛深度最深的为 Z2 预选着陆区中心点,为 0.58m,该深度时物理温度达 132.1 K。1m 和 2m 深度时物理温度最高均为 P1 点。综上,Z1 预选着陆区中心点物理温度条件良好,适合着陆。

2.4 水冰探测分析

基于 Mini-RF 初筛的雷达水冰点(图 5a),结合年均光照率小于 0.2(图 5b)、连续光照天数大于 50 天(图 5c)、年均亮温小于 110 K(图 5d)的约束条件,筛选了临近各着陆区的潜在水冰点(图 5d),共 4 个潜在水冰点(W1~W4)。W1 水冰点位于 Z1 预选着陆区的南侧;W2 位于 Z2 预选着陆区西南侧;W3 位

表 4 预选着陆区中心点物理温度剖面统计

Tab.4 Statistics on physical temperature profiles at candidate landing sites.

| 预选着陆区 | 中心点 | 物理温度/K | | | | | | 收敛温度 | 收敛深度/m |
|-------|-----|----------------|---------------|----------------|---------------|--------------|-------------|-------|--------|
| | | 月表(0m) 年最小值 | 月表(0m) 年均值 | 月表(0m) 年最大值 | 月表(0m) 年变化 | 1 m 深 年均值 | 2 m 深年均值 | | |
| Z1 | P1 | 64.7 | 164.2 | 315.5 | 250.8 | 182.3 | 183.8 | 185.1 | 0.44 |
| Z2 | P2 | 53.2 | 111.2 | 221.3 | 168.1 | 135.2 | 141.8 | 132.1 | 0.58 |
| Z3 | P3 | 58.8 | 134.4 | 284.2 | 225.4 | 157.7 | 161.5 | 157.3 | 0.49 |
| Z4 | P4 | 52.7 | 108.8 | 233.3 | 180.6 | 134.6 | 141.1 | 131.6 | 0.55 |

于 Z3 预选着陆区北侧; W4 位于 Z4 预选着陆区北侧。

热传模型模拟了 4 个潜在水冰点的浅层物理温度剖面(图 6)。4 个水冰点在 0.04~1.44 m 深度的年最大物理温度均小于 110 K, 存在水冰的可能性大。其中 W1 潜在水冰点的埋藏深度最浅, 为 0.01 m。结果表明 4 个潜在水冰点均满足水冰赋存的温度条件, 同时水冰埋藏深度还可为水冰钻取深度提供参考。

3 着陆区综合评估与分析

3.1 巡视可达性评估

为评估潜在水冰点的巡视可达性, 基于顾及能量耗费的路径规划模型, 开展了预选着陆区中心点至潜在水冰点的路径规划。分别对 Z1~Z4 预选着陆区的中心点(P1~P4)至临近水冰点的巡视可达性进行了评估(图 7)。结果表明, 4 个预选着陆区临近的潜在水冰点均可巡视探测(图 7b~e), 且规划的路径坡度较低, 整体基本安全。

3.2 预选着陆区综合分析

结合地形地貌、光照、辐射、温度、巡视可达水冰点, 对 Scott M 西南部的 4 个预选着陆区进行了综合评估(表 5), 这 4 个预选着陆区在地形安全性、能源供应等方面均具有着陆适宜性。具体地, Z1 预选着陆区的地形起伏小、平坦区域面积占比较大, 地形安全性高; 光照强和太阳辐射强、温度高, 可为着陆器

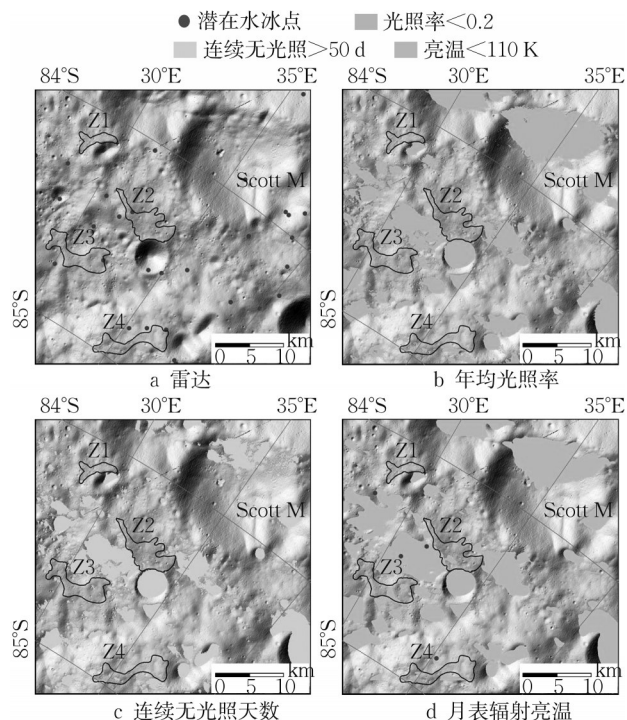


图 5 多重约束条件的水冰探测

Fig.5 Water ice detection

为验证水冰点的物理温度赋存条件, 基于一维

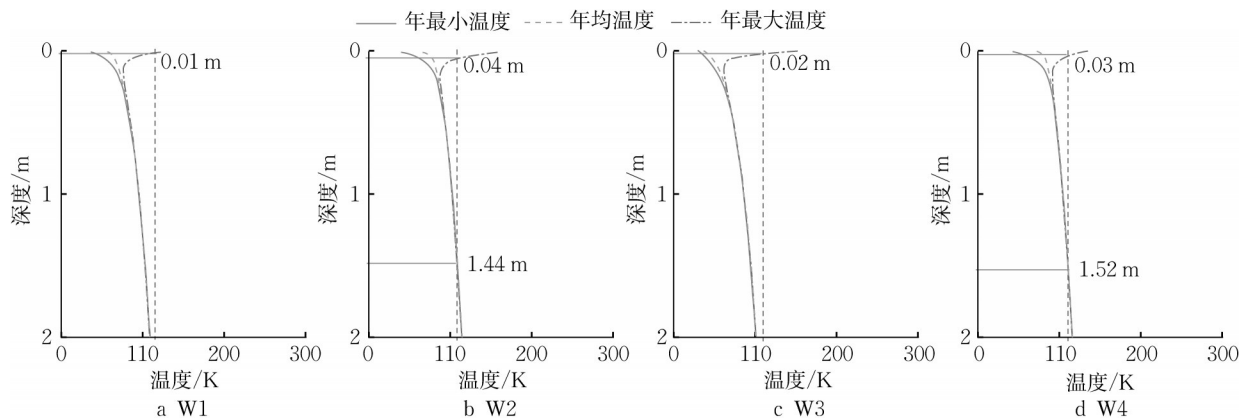


图 6 潜在水冰点浅层物理温度剖面

Fig.6 Physical temperature profiles of water ice.

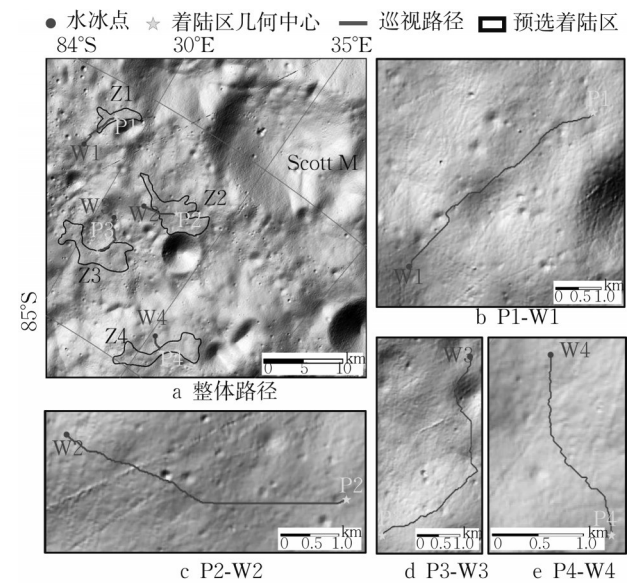


图7 预选着陆区中心点至水冰点的巡视可达性评估
Fig.7 Roving accessibility assessment from centers of candidate landing zones to water ice.

和巡视器的能源供应提供保障;Z2 预选着陆区地形起伏小、平坦区域面积占比大,地形安全性高;光照

和辐射强,能保障能源供应;Z3 预选着陆区平坦区域面积占比大,地形安全性高;光照和辐射较强、温度高,可为能源供应提供保障;Z4 预选着陆区平坦区域面积占比大,地形安全性高;光照和辐射较强,可为能源供应提供保障。

4 结语

为服务未来国际月球科研站任务,遴选符合科学目标和工程安全要求的月球科研站选址探测区域,在月球南极 Scott M 附近区域开展了着陆探测点智能选址、以及着陆区典型要素和巡视可达性的综合分析。针对着陆选址,基于多源空间数据量化工程安全和科学价值指标,利用 1D-CNN 选址模型遴选并划分了 4 个预选着陆区;针对典型环境要素,利用遥感探测和模型模拟方法,分析了预选着陆区的实时光照和辐射、物理温度剖面、水冰赋存等环境特征;针对巡视可达评估,利用顾及能量耗费的路径规划方法,评估了潜在水冰点的巡视路径通达性。综合分析了预选着陆区在工程安全性和水冰探测价值的优势。

表 5 预选着陆区典型环境要素综合统计

| Tab.5 Comprehensive statistics on typical environmental elements for candidate landing zones. | | | | | | | | |
|---|----------|------------|------------|------------|-----------------------------|----------|-----------|-------------|
| 区域 | DEM 均值/m | DEM 变化范围/m | 平坦区域面积占比/% | 年均光照率最高值/% | 太阳辐射均值/(W·m ⁻²) | 月表年均温度/K | 可达潜在水冰点/个 | 着陆区优势 |
| Z1 | 4 896 | 249 | 84.85 | 47 | 277.75 | 164.2 | 1 | 地形安全性高、供能高 |
| Z2 | 5 489 | 276 | 95.96 | 47 | 231.66 | 111.2 | 1 | 地形安全性高、供能高 |
| Z3 | 5 162 | 287 | 97.24 | 41 | 222.13 | 134.4 | 1 | 地形安全性高、供能较高 |
| Z4 | 6 454 | 396 | 92.01 | 43 | 251.51 | 108.8 | 1 | 地形安全性高、供能较高 |

开展月球科研站选址及典型环境要素分析,可为月球科研站的着陆选址和巡视规划提供关键支撑,为工程安全和科学价值实现提供保障。未来以期拓展在地质年代、矿物含量等科学探测价值的精细分析,服务于不同的深空探测任务。综上,基于团队前期技术和数据产品构建的综合分析方法,也可推广应用于其他潜在着陆区的典型环境要素分析,为月球科研站的着陆选址提供有益参考。

作者贡献声明:

冯永玖:学术构思、模型构建、论文修改、项目资助;
唐盼丽:模型构建、数据处理、论文写作;
陈书睿:模型讨论、数据处理;
席梦谔:模型讨论、数据处理;
叶真:讨论建议,论文修改;
金雁敏:讨论建议,论文修改;
刘世杰:讨论建议,论文修改;
李浩腾:数据处理、结果讨论;

王蓉:数据处理、结果讨论;
李鹏朔:数据处理、结果讨论;
童小华:学术指导、论文修改、项目资助。

参考文献:

- [1] 王赤, 林杨挺, 裴照宇, 等. 月球科研站的关键科学问题 [J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 830.
WANG C, LIN Y, PEI Z, *et al.* Key scientific questions related to the lunar research station [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6): 830.
- [2] 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站 [J]. 科学通报, 2020, 65(24): 2577.
PEI Z, LIU J, WANG Q, *et al.* Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24): 2577.
- [3] LI C, WANG C, WEI Y, *et al.* China's present and future lunar exploration program [J]. Science, 2019, 365(6450): 238
- [4] MAHANTI P, WILLIAMS J-P, ROBINSON M S, *et al.* Dynamic secondary illumination in permanent shadows within

- Artemis III Candidate Landing Regions [J]. The Planetary Science Journal, 2024, 5(3): 62.
- [5] 张思勃, 刘阳, 王慎泉, 等. 月表温度和地形对科研站选址的影响 [J]. 中国空间科学技术, 2024, 44(2): 125.
ZHANG S, LU Y, WANG S, *et al.* Effects of lunar surface temperature and topography on outpost location selection [J]. Space Science & Technology 2024, 44(2): 125.
- [6] 吴伟仁, 于登云, 王赤, 等. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究 [J]. 深空探测学报, 2020, 7(3): 223
WU W R, YU D Y, WANG C, *et al.* Research on the main scientific and technological issues on lunar polar exploration [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 223.
- [7] ZHAO J, XIAO L, QIAO L, *et al.* The Mons Rümker volcanic complex of the moon: A candidate landing site for the Chang'E-5 mission [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2017, 122(7): 1419.
- [8] PAUL L J. Candidate sites for lunar observatories, with a recommended example; The NE Orientale Basin [J]. AIP Conference Proceedings, 1990, 207(1): 315.
- [9] TAYLOR L A, TAYLOR D H S. Considerations for return to the moon and lunar base site selection workshops [J]. Journal of Aerospace Engineering, 1997, 10(2): 68.
- [10] DJACHKOVA M V, LITVAK M L, MITROFANOV I G, *et al.* Selection of Luna-25 landing sites in the south polar region of the Moon [J]. Solar System Research, 2017, 51(3): 185.
- [11] HERZIG T, KÖMLE N I, MACHER W, *et al.* Site selection, thermodynamics, environment and life support analysis for the pneumo planet inflatable lunar habitat concept [J]. Planetary and Space Science, 2022, 224: 105595.
- [12] FLAHAUT J, CARPENTER J, WILLIAMS J P, *et al.* Regions of interest (ROI) for future exploration missions to the lunar South Pole [J]. Planetary and Space Science, 2020, 180: 104750
- [13] BASILEVSKY A T, KRASILNIKOV S S, IVANOV M A, *et al.* Potential lunar base on mons malapert: topographic, geologic and trafficability considerations [J]. Solar System Research, 2019, 53(5): 383.
- [14] FENG Y, LI H, TONG X, *et al.* Optimized landing site selection at the lunar south pole: a convolutional neural network approach [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 10998.
- [15] 张焄, 杜宇, 李飞, 等. 月球南极探测着陆工程选址建议 [J]. 深空探测学报, 2020, 7(3): 232.
ZHANG H, DU Y, LI F, *et al.* Proposals for sites selection of soft landing on lunar south polar region [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 232.
- [16] FENG X, GUO Q. The lunar surface temperature real-time model [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(6): 928.
- [17] WILLIAMS J P, PAIGE D A, GREENHAGEN B T, *et al.* The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment [J]. Icarus, 2017, 283: 300.
- [18] HAYNE P O, BANDFIELD J L, SIEGLER M A, *et al.* Global regolith thermophysical properties of the moon from the diviner lunar radiometer experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2017, 122(12): 2371.
- [19] THOMSON B J, BUSSEY D B J, NEISH C D, *et al.* An upper limit for ice in Shackleton crater as revealed by LRO Mini-RF orbital radar [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(14): 2012GL052119.
- [20] HAYNE P O, HENDRIX A, SEFTON-NASH E, *et al.* Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements [J]. ICARUS, 2015, 255: 58.
- [21] FENG Y, CAO Y, TONG X, *et al.* High-accuracy lunar global brightness-temperature mapping using third-order Fourier fitting and co-kriging interpolation [J]. ICARUS, 2023, 403: 115646.
- [22] TONG X, HUANG Q, LIU S, *et al.* A high-precision horizon-based illumination modeling method for the lunar surface using pyramidal LOLA data [J]. ICARUS, 2023, 390: 115302.
- [23] 张吉栋, 孟治国, 平劲松, 等. 基于LOLA数据的Aristarchus高原光照特性初步研究 [J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 171.
ZHANG J, MENG Z, PING J, *et al.* Preliminary study of illumination characteristics of aristarchus plateau using LOLA data [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 171.
- [24] 张吉栋, 孟治国, 朱蕴哲, 等. 基于LOLA数据的冯·卡门撞击坑太阳辐射研究 [J]. 深空探测学报, 2018, 5(1): 12.
ZHANG J, MENG Z, ZHU Y, *et al.* Research on solar radiation of von kármán crater using LOLA data [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(1): 12.
- [25] FENG J, SIEGLER M A. Reconciling the Infrared and microwave observations of the lunar south pole: a study on subsurface temperature and regolith density [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2021, 126(9): 1
- [26] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BALOGA S M, *et al.* Evidence for water ice on the Moon: Results for anomalous polar craters from the LRO Mini-RF imaging radar [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2013, 118(10): 2016.
- [27] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A, *et al.* Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the moon's south polar region [J]. Science, 2010, 330(6003): 479.